

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

**Energie větru, návrh listu rotoru větrné
elektrárny dle Betzovy a Shmitzovy teorie**

**Wind Energy, Wind Turbine Rotor Blade
Design According Betz and Schmitz Theory**

Student: Tomáš Majkus

Vedoucí práce: Ing. Zbyszek Szeliga, PhD

2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Majkus**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: Energie větru, návrh listu rotoru větrné elektrárny dle Betzovy a Schmitzovy teorie
Wind Energy, Wind Turbine Rotor Blade Design According Betz and Schmitz Theory

Zásady pro vypracování:

Vypracujte:

- rešeršní část práce týkající se možností využití větrné energie - historický vývoj, současnost,
- teoretickou část zabývající se problematikou stanovení Betzovy účinnosti jako podklad pro základní návrh listu větrné elektrárny,
- energetický potenciál dané lokality,
- výpočetní část, stanovení základních parametrů listu větrné elektrárny zadaného výkonu dle Betzovy a Schmitzovy teorie.

Seznam doporučené odborné literatury:


RYCHETNÍK, V. *Větrné motory*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996. 61 s. ISBN 80-7078-281-1
HAU, E. *Wind Turbine. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlin: Springer, 2005. 783 s. ISBN 978-3-642-06348-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

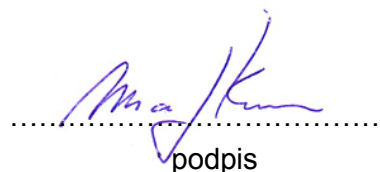
V Ostravě: 21. 5. 2012


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2012


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Majkus

Adresa trvalého pobytu autora práce: Všechnovice, Všechnovice 25, 753 53

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MAJKUS, T. *Energie větru, návrh listu rotoru větrné elektrárny dle Betzovy a Schmitzovy teorie*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 50s. Vedoucí práce: Szeliga, Z.

Tato bakalářská práce se zabývá energií větru. Jejím obsahem je v první části historický vývoj ve využívání energie větru a budování větrných elektráren, v druhé praktické části jsou pak provedeny výpočty základních rozměrů listu rotoru větrné elektrárny pro zadaný výkon dle Schmitzovy a Betzovy teorie. V práci je uveden ukázkový výpočet základních rozměrů a grafické zpracování výsledku, pro obě dané teorie.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MAJKUS, T. *Wind Energy, Wind Turbine Rotor Blade Design According Betz and Schmitz Theor*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2012, 50 p. Thesis head: Szeliga, Z.

Bachelor thesis deals with wind energy. Its content is the first part of the historical development of wind energy and building wind farms, in the second part of the practical calculations are then made basic dimensions of wind turbine rotor blade for a specified power according to Schmitz and Betz theory. The work is a sample size calculation of basic graphic design and results for both the theory.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energie větru; List rotoru; Betzova teorie; Schmitzova teorie

KEYWORDS

Wind energy; Rotor blade; Betz theory; Schmitz theory

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A INDEXU.....	8
0 ÚVOD	10
1 ZÁKLADNÍ POZNATKY K TEORII VĚTRU	11
1.1 CO JE TO VÍTR A JAK VZNIKÁ?	11
1.2 VĚTRNÁ ENERGETIKA.....	12
1.3 PROČ VĚTRNÁ ENERGIE?	13
1.4 JAKÝ JE VĚTRNÝ POTENCIÁL V ČR?	13
2 HISTORICKÝ VÝVOJ VE VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU	15
2.1 VÝVOJ BUDOVÁNÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR.....	16
2.2 SOUČASNÉ NEJVĚTŠÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY, PARKY V ČR.....	18
2.2.1 Kryštofovy Hamry	19
2.2.2 Horní Loděnice	19
2.2.3 Nová Ves v Horách.....	20
2.2.4 Pchery.....	20
3 HLAVNÍ ČÁSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	21
3.1 ROTOR	21
3.2 STROJOVNA	22
3.3 STOŽÁR (TUBUS)	23
3.4 ZÁKLAD	23
4 DŮLEŽITÉ ASPEKTY PRO VÝSTAVBU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	24
5 PRINCIP ČINNOSTI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	25
6 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	26
6.1 PODLE KONCEPCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	26
6.2 PODLE AERODYNAMICKÉHO PRINCIPU	27
6.3 PODLE VÝKONU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	28
7 NÁVRH LISTU ROTORU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	28
8 BETZOVA TEORIE.....	29
8.1 NÁVRH LISTU DLE BETZE.....	30
8.2 VÝPOČET LISTU DLE BETZE	32
8.3 ZÁVĚR K VÝPOČTU DLE BETZOVY TEORIE:	36

9	SCHMITZOVA TEORIE	37
9.1	NÁVRH LISTU DLE SCHMITZOVY TEORIE	37
9.2	VÝPOČET LISTU DLE SCHMITZE	41
9.3	ZÁVĚR K VÝPOČTU DLE SCHMITZOVY TEORIE:.....	43
10	ZÁVĚR.....	45
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
12	SEZNAM PŘÍLOH	50

Seznam použitých značek a indexu

Značky a jednotky

Značka	Veličina	Jednotka SI
D	<i>průměr</i>	m
\dot{E}	<i>maximální výkon</i>	W
F	<i>síla</i>	N
H	<i>hloubka</i>	m
M	<i>moment</i>	Nm
P	<i>výkon</i>	W
P_{bar}	<i>tlak</i>	Pa
R	<i>poloměr</i>	m
S	<i>plocha</i>	m ²
T	<i>teplota</i>	K
c	<i>součinitel</i>	1
dA	<i>plocha v jednotlivých zónách</i>	m ²
n	<i>otáčky</i>	s ⁻¹
r	<i>poloměr</i>	m
t	<i>teplota</i>	°C
u	<i>unášivá rychlost</i>	m.s ⁻¹
u_R	<i>rychlost na konci listu</i>	m.s ⁻¹
v	<i>rychlost větru</i>	m.s ⁻¹
w	<i>relativní rychlost</i>	m.s ⁻¹
z	<i>počet lopatek</i>	1
β	<i>úhel střední rychlosti proudu</i>	°
γ	<i>úhel nastavení profilu</i>	°
φ	<i>úhel nastavení profilu - Schmitz</i>	°
η	<i>účinnost</i>	1
λ	<i>rychlostní součinitel</i>	1
ω	<i>úhlová rychlost</i>	s ⁻¹
ρ	<i>hustota</i>	kg.m ⁻³

Indexy

Indexy	Význam
K	kola
x	odporu
y	vztlaku
el	elektrická
mech	mechanická
obv	obvodová
odp	odporová
top	tětiny profilu
vet	větru
vz	vztlaku

0 Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo sestavení rešeršní části, týkající se možností využití větrné energie, shrnutí historického vývoje v budování větrných elektráren až po současnost a provedení výpočtů základních rozměrů listu rotoru větrné elektrárny pro zadané parametry.

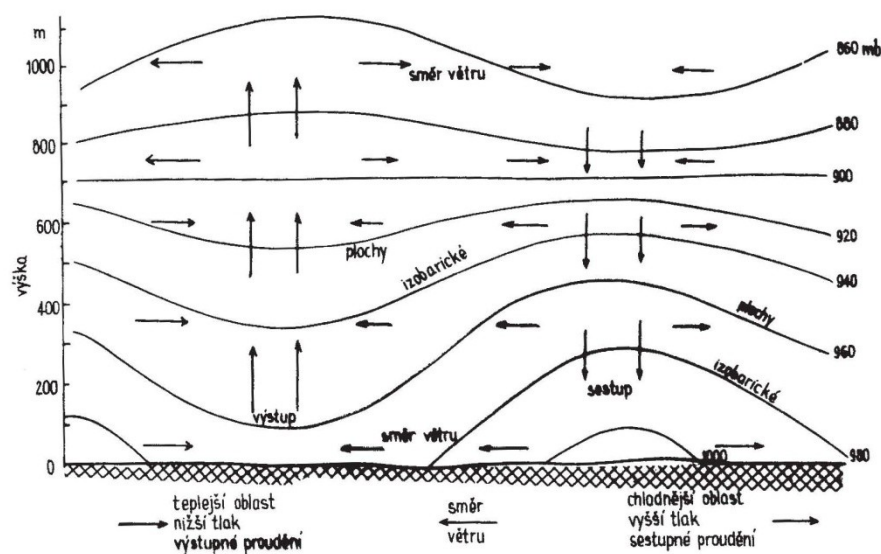
Návrh listu rotoru větrné elektrárny byl v bakalářské práci proveden pro zadaný výkon větrné elektrárny. Výpočet listu byl proveden dle dvou teorií a to dle Betzovy teorie a teorie Schmitzovy.

1 Základní poznatky k teorii větru

1.1 Co je to vítr a jak vzniká?

Vítr je jeden z nejmohutnějších živlů přírody, nevyčerpatelný zdroj energie. Je základní meteorologický prvek popisující pohyb vzduchu v určitém místě atmosféry v daném časovém okamžiku vzhledem k zemskému povrchu. Za vítr se považuje jen horizontální složka vektoru větru. Stanovuje se směr a rychlost. Směrem větru se rozumí směr, odkud vítr vane. Udává se obvykle v úhlových stupních (např.: 90° = východní vítr, 180° = jižní vítr, 270° = západní vítr, 360° = severní vítr, 0° = bezvětří atp.). Směr větru se určuje pomocí větrných směrovek, které se umísťují na stožárech ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem. Rychlost větru je vzdálenost, kterou urazí pohybující se vzduch za jednotku času, nejčastěji se udává v metrech za sekundu. Je vyvolaný v důsledku nestejnoměrného ohřívání vzduchu sluncem. [3]

Teplo způsobuje, že se vzduch rozpíná a stoupá, tím zároveň klesá jeho tlak. Zatímco chlad způsobuje, že je vzduch těžší a jeho tlak stoupá. Z takto vzniklých oblastí vyššího a nižšího tlaku se vzduchové masy přesouvají směrem z oblastí vyššího tlaku do oblastí s nižším tlakem (viz. obr. č. 1.1). Čím větší je rozdíl v tlaku, tím ostřejší vítr vane. Síla větru má svoje stupnice, my si pro ukázkou ukážeme Beaufortovu stupnici, která je zobrazena v tabulce č. 1.1.



Obr. č. 1.1 Pohyb vzduchové masy

Stupeň	Rychlost větru		Tlak větru v kg/m ²	Slovní označení	Znaky na souši	Znaky na moři
	m/s	km/h				
0	0 - 0,2	0 - 1	0	bezvětří	kouř stoupá svisle vzhůru	moře je zrcadlově hladké
1	0,3 - 1,5	1 - 5	0 - 0,1	vánek	kouř už nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje	malá šupinovitě zčeřená vlny bez pěno vých vrcholů
2	1,6 - 3,3	6 - 11	0,2 - 0,6	slabý vítr	vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje	malé vlny ještě krátké ale výraznější, se sklovitými hřebeny, které se nelámou
3	3,4 - 5,4	12 - 19	0,7 - 1,8	mírný vítr	listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory	hřebeny vln se začínají lámat, pěna převážně skelná. Ojedinělý výskyt malých pěnových vrcholů
4	5,5 - 7,9	20 - 28	1,9 - 3,9	dosti čerstvý vítr	vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi	vlny ještě malé ale prodlužují se. Hojný výskyt pěnových vrcholů.
5	8 - 10,7	29 - 38	4,0 - 7,2	čerstvý vítr	hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají	dosti velké a výrazně prodloužené vlny. Všude bílé pěnové vrcholy, ojedinělý výskyt vodní tříště.
6	10,8 - 13,8	39 - 49	7,3 - 11,9	silný vítr	pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, je nesnadné používat deštník	velké vlny. Hřebeny se lámou a zanechávají větší plochy bílé pěny. Trochu vodní tříště.
7	10,9 - 17,1	50 - 61	12,0 - 18,3	prudký vítr	pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná	moře se bouří. Bílá pěna vzniklá lámáním hřebenů vytváří pruhy po větru.
8	17,2 - 20,7	62 - 74	18,4 - 26,8	bouřlivý vítr	láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná	dosti vysoké vlnové hory s hřebeny výrazné délky, od jejich okrajů se začíná odtrhává vodní tříšť.
9	20,8 - 24,4	75 - 88	26,9 - 37,3	vichřice	menší škody na stavbách	vysoké vlnové hory, husté pásy pěny po větru, moře se začíná valit, vodní tříšť snižuje viditelnost
10	24,5 - 28,4	89 - 102	37,4 - 50,5	silná vichřice	na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a ničí domy	velmi vysoké vlnové hory s překlápějícími a lámajícími se hřebeny, moře bílé od pěny. Těžné nárazovité valení moře.
11	28,5 - 32,6	103 - 117	50,6 - 66,5	mohutná vichřice	rozsáhlé zpuštění plochy	mimořádně vysoké pěnové hory. Viditelnost znehodnocena vodní tříští.
12	32,7 - ??	118 - ??	66,6 - ??	orkán	ničivé účinky odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami	vzduch plný pěny a vodní tříště. Moře zcela bílé. Viditelnost velmi snížena. Není výhled.

Tabulka č. 1.1 Beaufortova stupnice [3]

1.2 Větrná energetika

Je v současnosti označení pro oblast techniky zabývající se využitím energie větru jako zdroje elektrické energie. V dnešní době stroje, které využívají kinetické energie větru k její transformaci na energii mechanickou, posléze elektrickou energii nazýváme větrné elektrárny (větrná turbína). Teoretický výkon větru je úměrný třetí mocnině rychlosti proudící vzdušné masy. Protože rychlost větru značně kolísá, nedosahují větrné elektrárny po většinu doby nominálních hodnot generovaného výkonu. V historii se místo převodu na elektřinu, přímo konala mechanická práce. Větrný mlýn například mlel obilí, větrnými stroji se čerpala voda, lisoval olej, stloukala plst' nebo poháněly katry. Vítr se také používá k pohonu dopravních prostředků, typickým případem jsou lodě (plachetnice). [4]

1.3 Proč větrná energie?

Vítr je zdroj nevyčerpatelný, jako zdroj energie je zdarma a je možné jeho energii bez emisních škodlivin přeměnit v elektrickou energii. Obnovitelné zdroje energie obecně budou hrát v budoucnu jednu z rozhodujících rolí při zajištění tzv. energetické bezpečnosti zemí Evropy. Výrazným plusem větrných elektráren je i cena elektrické energie, která je v současnosti již v mnoha zemích bez státní podpory konkurenceschopná ke klasickým zdrojům elektrické energie a většinou soupeří s vodní energií o post nejlevnějšího zdroje OZE. V zemích EU překonává svoji cenou i nově stavěné uhelné elektrárny, které prodražuje nutnost nákupu emisních povolenek. Je však nutno zmínit jednu ze základních nevýhod ve využití větrné energie a jejího vlivu na elektroenergetické soustavy a to stochastičnost výroby elektrické energie. [5]

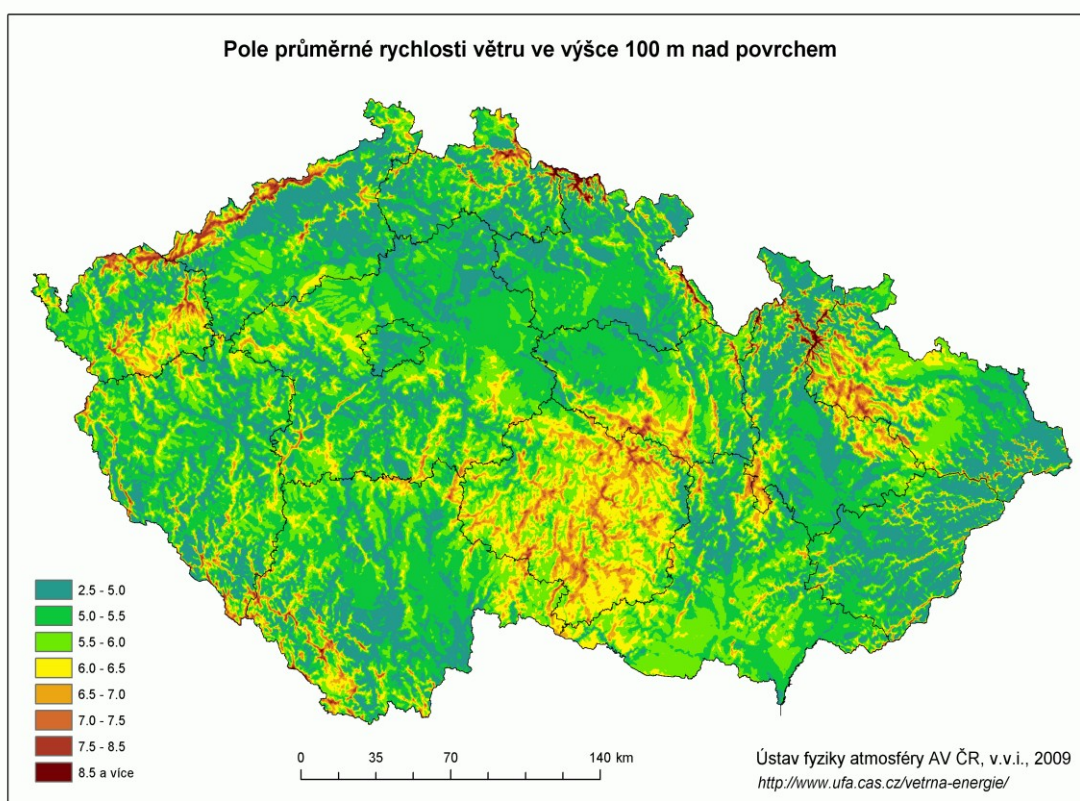
1.4 Jaký je větrný potenciál v ČR?

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [6].

V první řadě si hlavně musíme definovat, o jaký větrný potenciál se jedná. V teoretické rovině můžeme definovat tzv. klimatologický potenciál. Ten udává sumu energie, kterou je možno z větru získat za určitých, předem daných podmínek. Jedná se o vysokou, avšak zcela nepřesnou hodnotu, ve které nejsou zahrnuty všechny technické potřeby pro větrnou energetiku a ani její zásadní omezení v oblasti legislativy. My hledáme proto tzv. realizovatelný potenciál, to znamená potenciál, jehož realizace je za současných podmínek možná.

Na základě nových zpřesněných výpočtů vycházejících z aktuálních technologií větrných elektráren bylo zjištěno, že na území České republiky existuje značně vysoký technický potenciál větrné energie, v maximální variantě odpovídající zhruba celé současné potřebě elektrické energie v České republice, to je ovšem pouze teoretická hodnota. Realizovatelný potenciál je podstatně nižší. Tento realizovatelný potenciál se za současných podmínek odhaduje přibližně na cca 2750 MW instalovaného výkonu.

Tento potenciál odpovídá zhruba počtu 1288 větrných elektráren se souhrnnou roční výrobou elektrické energie přibližně 5,6 TWh. Největší část větrného potenciálu, jak můžeme vidět na přiloženém *obrázku č. 1.2*, se nachází na území Českomoravské vrchoviny, Nízkého Jeseníku a Krušných hor. Z hlediska větrného potenciálu je naše republika téměř srovnatelná s vnitrozemskými oblastmi Německa či Rakouska. Rozdíl v míře využívání energie z větru na našem území a na území těchto sousedních států tak není dán horšími větrnými podmínkami na našem území, ale horšími podmínkami administrativními. V polovině roku 2009 bylo z tohoto potenciálu využito jen 175 MW. Když si sečteme obnovitelné zdroje, vítr spolu s biomasou, sluncem, geotermální energií a malými vodními elektrárnami, jsou tyto zdroje pro nás jedinými možnými zdroji, díky kterým je možno očekávat naplnění 13% podílu OZE ze spotřeby veškeré energie v ČR, jak nám ukládá závazná směrnice EU. Tento cíl musí být splněn roku 2020. [6]



Obr. č. 1.2 Povětrnostní mapa ČR [23]

2 Historický vývoj ve využití energie větru

Předchůdci větrných elektráren byly větrné mlýny (*obr. č. 2.1*), které sloužily pro transformaci energie větru na energii mechanickou, pro potřebu mletí a dále pak i čerpání vody, tzv. větrná čerpadla (*obr. č. 2.2*). V Číně a Persii se tyto stroje používaly již v 7. století. V 10. století se prostřednictvím Arabů objevují ve Španělsku a do ostatních evropských zemí postupně pronikaly ve 12. a 13. století. Význam větrné energie vrcholil v 16. století. První písemné zmínky o větrném mlýnu v Evropě pochází z r. 833, v Čechách pak historické prameny uvádějí rok 1277 jako první postavení větrného mlýnu, a to v zahradě Strahovského kláštera v Praze. Větrné mlýny využívaly tlak větru na lopatky nebo křídla a otáčely se za větrem a to celé, popřípadě jen jejich střešní část s křídly tzv. holandské mlýny. Natáčení bylo ovládáno pomocí jednoduchých vnějších nebo vnitřních mechanismů a to ručně, pouze v poslední etapě jejich vývoje byly holandské mlýny vybaveny i automatickým natáčením střešní části. Výkon větrných mlýnů byl regulován přidáváním nebo ubíráním výplně křídel. Větrná čerpadla se využívala k čerpání vody pro továrny, pro závlahy nebo obecní vodovody. U nás je vyráběla v první polovině 19. století firma Kunz v Hranicích na Moravě, ukázkou takového čerpadla od této firmy můžeme vidět *na obrázku č. 2.2*. Tato zařízení můžeme zahlédnout ještě dnes, ale již jen jako technické památky. [8]

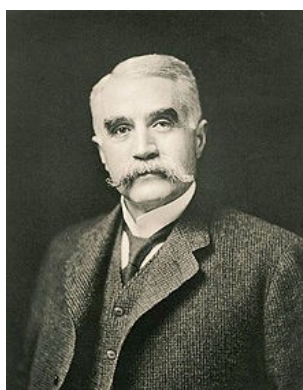


Obr. 2.1 Větrný mlýn [8]



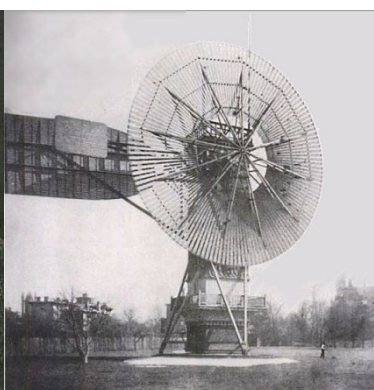
Obr. 2.2 Větrný mlýn více lopatkový
firmy Kunz [9]

Nyní se už dostáváme do doby, kdy byly sestrojeny první větrné elektrárny. První dvě větrné elektrárny byly sestrojeny téměř ve stejném časovém období. Na přelomu let 1887 – 1888 byla Američanem Charles F. Brushem (*obr. č. 2.3*) sestrojena první automatická větrná turbína v Clevelandu ve státě Ohio (*obr. č. 2.4*). O tři roky později sestavil elektrárnu i dánský profesor matematiky, fyziky a chemie Poulem la Courem (*obr. č. 2.5*). Elektrárna byla postavena v dánském Askově (*obr. č. 2.6*) a byla technologicky i výkonem slabší než elektrárna sestavena Brushem v Ohio. Ale Courem se už na tu dobu věnoval poměrně vizionářské myšlence jak akumulovat energii vyrobenou větrnými elektrárnami, pro čas bezvětrí. [10]



Obr. 2.3

Charles F. Brush [10]



Obr. 2.4

*První větrná turbína
v Clevelandu [10]*



Obr. 2.5

Paule la Coure [11]



Obr. 2.6

*Elektrárna v dánském
Askově [10]*

2.1 Vývoj budování větrných elektráren v ČR

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [12].

Novodobý vývoj v budování větrných elektráren v ČR bychom mohli rozdělit do dvou etap. První etapa spadá do první poloviny 90. let, kdy bylo postaveno na našem území 24 elektráren s celkovým instalovaným nominálním výkonem 8,2 MW. Budování VtE v tomto období bylo motivováno hlavně těmito důvody:

- 1) Po otevření hranic zapůsobila inspirativně masivní výstavba VtE v Dánsku a Německu.

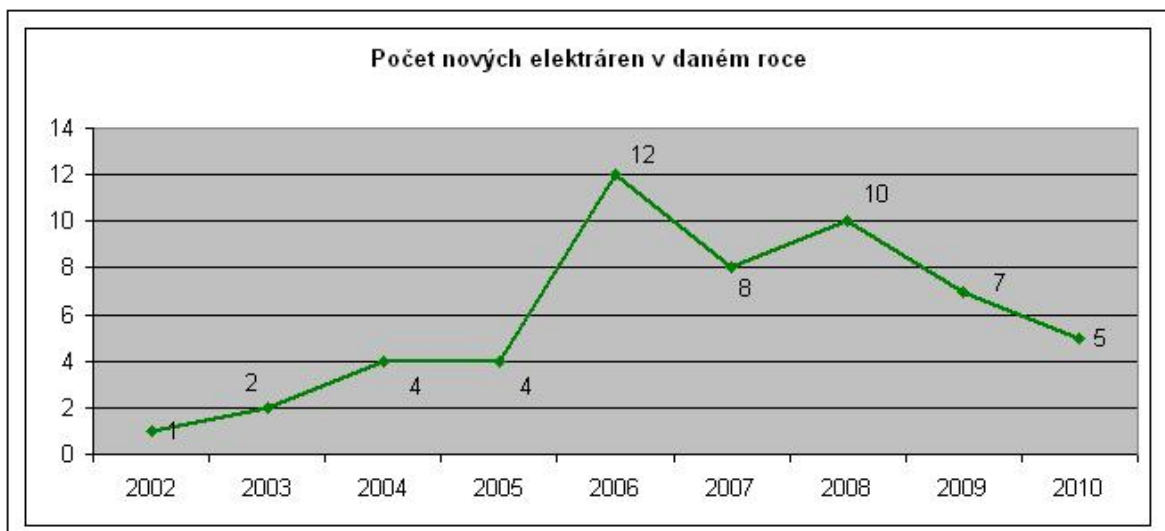
- 2) VtE vyráběné na území ČR byly nabízeny za cenu zhruba o 30% nižší než v zahraničí.
- 3) Obecně platil předpoklad, že výkupní ceny elektřiny z větru budou obdobné jako ve zmíněných státech.

Tyto předpoklady se nenaplnily a většina těchto elektráren se potýkala s vážnými problémy, některé z nich zkrachovaly. Elektrárny byly často stavěny na místech s nízkou intenzitou rychlostí větru, české stroje měly mnoho neduhů a trpěly častou poruchovostí, což způsobovalo časté výpadky. Výkupní cena elektřina z VtE se až do roku 2001 pohybovala na rozmezí 0,9 až 1,13,- Kč/kWh. Provoz těchto elektráren byl nerentabilní.

Zlom nastal v roce 2002, kdy Energetický regulační úřad (ERÚ) stanovil minimální výkupní cenu elektřiny pro základní kategorie obnovitelných zdrojů z větru. Postupný nárůst cen (a také jistota garance jejich výše) přispěly k zatraktivnění větrné energie pro mnoho investorů. Na základě rozhodnutí ERÚ činila nově výkupní cena od 1. ledna 2002 3,- Kč/kWh. To samozřejmě znamenalo, že rok od roku se opět začal zvyšovat počet větrných elektráren v ČR (viz. graf č. 2.1). Jasně podmínky a garanci pro stabilitu podnikání v tomto odvětví pak přinesl zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů. Účelem tohoto zákona je ochrana životního prostředí, podpora využití obnovitelných zdrojů energie a trvale udržitelný rozvoj společnosti. Česká republika se v r. 2010 ve smlouvě o přistoupení k Evropské unii zavázala zvýšit podíl výroby elektřiny na hrubé domácí spotřebě z OZE na 8%, což je hluboko pod průměrem EU, jen tři státy mají cíle nižší. Tento cíl byl v r. 2010 splněn (viz. tabulka č. 2.1).

		I...VIII 2009	I...XII 2009	I...VIII 2010
hrubá tuzemská spotřeba elektřiny	GW.h	44 803	68 606	46 643
výroba elektřiny z OZE	GW.h	3 207	4 661	3 973
podíl OZE na hrubé spotřebě	%	7,16%	6,8%	8,52%

Tabulka č. 2.1 Vývoj podílu elektřiny z OZE v ČR [12]



Graf č. 2.1 Počet nových větrných elektráren [12]

2.2 Současné největší větrné elektrárny, parky v ČR

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [13].

V současnosti činí celkový instalovaný výkon ve větrných elektrárnách na území ČR již zhruba 215 MW. Jednoznačný vítěz v tomto ohledu je Ústecký kraj se svým instalovaným výkonem v rozsahu 87 MW. Další místa, kde můžeme vidět mnoho větrných parků, jsou Olomoucký kraj s instalací ve výši 37,2 MW a Karlovarský kraj, kde je celkový výkon s instalací 36 MW. Jaké větrné elektrárny jsou největší a kde je najdete? V následující *tabulce* č. 2.2. je zobrazeno pět největších elektráren na území ČR, ke třem největším si v krátkosti něco řekneme.

Lokalita	Kraj v ČR	Počet turbín	Celkový instalovaný výkon [MW]	Roku uvedení do provozu	Roční výroba elektřiny v roce 2009 (GWh)
Kryštofovy Hamry	Ústecký	21	42	2007	97,1
Horní Loděnice	Olomoucký	9	18	2009	15,8
Nová Ves v Horách	Ústecký	7	13	2003	28,8
Jindřichovice	Karlovarský	4	9,2	2010	-
Krásná	Karlovarský	4	8	2009	-

Tabulka č. 2.2 Pět největších elektráren v ČR

2.2.1 Kryštofovy Hamry

Tento obří větrný park se nachází v Ústeckém kraji (*obr. č. 2.1*), je největší v České Republice a jeho celkový instalovaný výkon činí 42 MW. Farma se skládá z 21 turbín (každá 2 MW) umístěných na Krušnohorském hřebeni. Do provozu byla uvedena v roce 2007 a v roce 2009 se pohybovala roční výroba elektřiny v hodnotách 97,1 GWh. Hamry tak ročně dokážou zásobit až 30 tis. domácností a ročně ušetří emise CO₂ v rozsahu 70 tis. tun.



Obr. č. 2.1 Kryštofovy Hamry [13]

2.2.2 Horní Loděnice

Tato elektrárna (*obr. č. 2.2*) leží v Olomouckém kraji mezi obcemi Lipina, Těšíkov a Horní Loděnice a byla uvedena do provozu v květnu 2009. S celkovým instalovaným výkonem 18 MW se v současnosti jedná o největší větrný park na území Moravy. Elektrárna začíná pracovat při rychlosti větru 4 m/s a vypíná se při 25 m/s. Disponuje 9 turbínami (každá o výkonu 2 MW), za rok 2009 vyrobily 15,8 GWh elektrické energie. Roční úspora CO₂ je minimálně 30tis. tun.



Obr. č. 2.2 Horní loděnice [13]

2.2.3 Nová Ves v Horách

Elektrárna (*obr. č. 2.3*) leží na hřebenu Krušných hor a je zapsána v katastru obce Nová Ves v Horách, obec leží v Ústeckém kraji. Elektrárna se skládá ze 7 turbín o celkovém instalovaném výkonu 13 MW, do provozu byly uváděny od roku 2003. Za rok 2009 vyrobily všechny turbíny celkově 28,8 GWh.



Obr. č. 2.3 Nová Ves v Horách [13]

2.2.4 Pchery

Jak jste si všimli elektrárna Pchery (*obr. č. 2.4*) se v *tabulce č. 3* nenachází, ale my si ji uvádíme proto, že se nejedná o největší, ale o nejvýkonnější elektrárnu v České republice. Pchery leží na kladensku a celkový instalovaný výkon je 6 MW při dvou turbínách. Plánovaná výtěžnost větrného parku je 11 GWh.



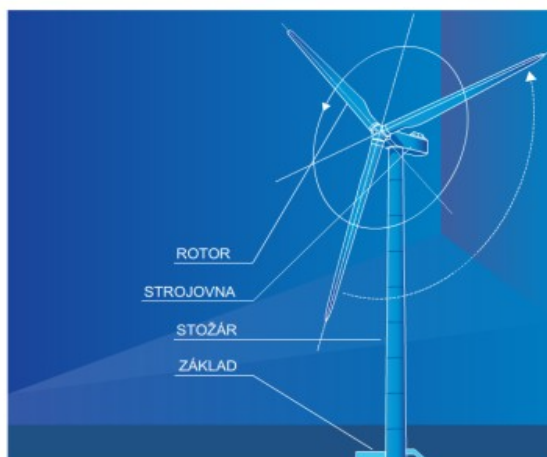
Obr. č. 2.4 Pchery [14]

Jen pro srovnání s českými větrnými elektrárnami si zmíníme větrnou elektrárnu Roscoe, která je zatím největší větrnou farmou na světě a nachází se v Texasu (USA). Byla spuštěna 1. října 2009. Větrná farma Roscoe má výkon 781,5 MW a je tvořena 627 větrnými turbínami. Roscoe je schopna pokrýt spotřebu 230 tis. domácností.

3 Hlavní části větrné elektrárny

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [15].

Větrná elektrárna je sestavena ze čtyř hlavních částí a to z rotoru, strojovny, stožáru a základu, jak je vidět na schematickém *obrázku č. 3.1*.



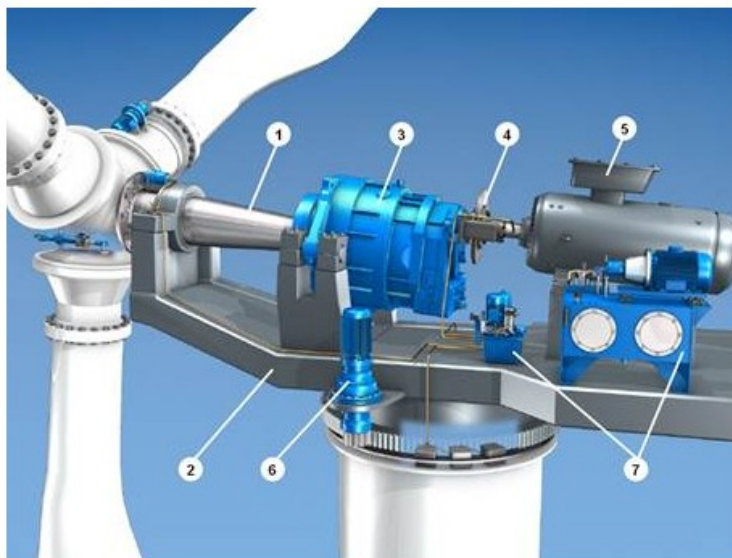
Obr. č. 3.1 Části větrné elektrárny [15]

3.1 Rotor

Je zařízení, které slouží k přeměně kinetické energie větru na energii mechanickou. Je tvořen u současných konstrukcí s vodorovnou osou rotace téměř výlučně třemi listy uchycenými na hlavu rotoru. Listy jsou vyrobené převážně ze sklolaminátu a jsou zkonstruovány tak, aby jejich optimální tvar umožňoval efektivní transformaci energie větru na rotor. Průměry listů větrných elektráren se v současnosti pohybují od 25 m do 130 m.

3.2 Strojovna

Gondola (obr. č. 3.2) větrné elektrárny je umístěna na vrcholu stožáru, v ní je uložena celá strojová část větrné elektrárny. Každý výrobce má sice svůj princip uspořádání soustrojí a tedy i vybavení strojovny, ale nejčastěji je rotor umístěn na hřídeli, která výkon od rotoru přenáší do převodovky. Ta zvyšuje otáčky pro generátor, který pohání.

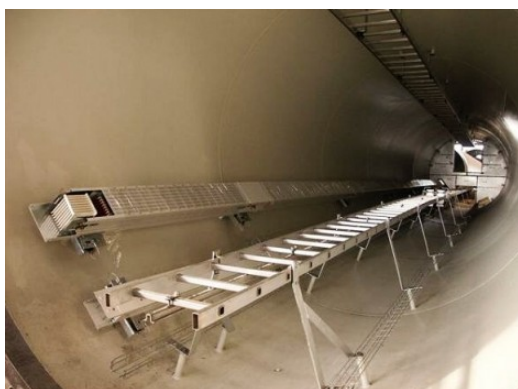


Obr. č. 3.2 Strojovna od firmy Siemens [15]

- 1) Hlavní hřídel větrné elektrárny
- 2) Nosný rám strojovny
- 3) Převodovka větrné elektrárny
- 4) Spojení mezi převodovkou a generátorem
- 5) Generátor větrné elektrárny
- 6) Systém natáčení strojovny
- 7) Hydraulické systémy větrné elektrárny

3.3 Stožár (tubus)

Výška stožáru se v dnešní době standardně pohybuje od 40 do 110 m. Najdeme ale nižší i vyšší instalace. Stožár bývá sestaven z několika segmentů, které mají obvykle délku 20 m. Tubus je hlavní částí nosného systému větrné elektrárny, kdy rotor spolu s gondolou jsou na stožáru namontované tak, aby se mohly otáčet okolo vertikální osy do směru větru. Vyrábějí se z oceli (*obr. č. 3.3*) nebo betonu (*obr. č. 3.4*). S konstrukcí stožáru úzce souvisí také velikost a tvar základů pro větrnou elektrárnu. Přes stožár se dostává obsluha do strojovny pro případné opravy a kontroly.



Obr. č. 3.3 Ocelový tubusový
stožár [15]



Obr. č. 3.4 Prefabrikovaný
betonový stožár [15]

3.4 Základ

Základ je důležitá část větrné elektrárny, která se staví již několik týdnů před samotnou výstavbou větrné elektrárny. Je to nejtěžší část větrné elektrárny (hmotnost bývá přes 1000 tun), ale po výstavbě není prakticky vidět. Před samotnou výstavbou základu se musí provádět důkladný geologický průzkum, aby se zjistila stabilita prostředí ve spodních vrstvách zeminy. VtE je totiž velmi vysoká stavba, která díky svému hmotovému rozložení je velmi citlivá na vychýlení (odklon od svislice) a s tím související stabilitu. Základ může mít několik tvarů: čtvercový (*obr. č. 3.5*), kruhový nebo šestiboký. Základ větrné elektrárny mohou tvořit i pilíře, které se používají u větrných elektráren stavěných na moři (*obr. č. 3.6*).



Obr. č. 3.5 Betonový základ [15]



Obr. č. 3.6 Základ tvořený pilíři [15]

4 Důležité aspekty pro výstavbu větrné elektrárny

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [16].

Pro výstavbu větrných elektráren je samozřejmě nutné nalezení lokality s vhodnými větrnými podmínkami. Využití větrné energie je smysluplné od střední rychlosti větru 4 m/s v dané lokalitě. V místě výstavby větrné elektrárny musí být naměřena nebo jiným způsobem zjištěna, ve výšce 30 metrů nad terénem, roční průměrná rychlost větru, která by měla být minimálně 5,2 m/s. Průměrné využití instalovaného výkonu by mělo dosáhnout min. 1 500 h/rok. Důležitým faktorem je i charakter povrchu, případně rozmístění nadzemních překážek, jako jsou stromy, budovy atd. Z hlediska rychlosti větru lze sestavit podmínky pro výstavbu středních a velkých větrných elektráren do následující tabulky č. 4.1.

4,0 – 4,9 m/s	oblasti s problematickou rentabilitou středních a velkých VTE
5,0 – 5,9 m/s	oblasti vhodné pro výstavbu středních a velkých VTE
nad 6,0 m/s	oblasti mimořádně vhodné pro výstavbu VTE s velkým výkonem

Tabulka č. 4.1 Orientační doporučení oblasti k výstavbě větrných elektráren dle střední rychlosti větru [16]

Velice důležitá podmínka je i vzdálenost větrné elektrárny od obydlí s ohledem na hlučnost. Jedná se o mechanický hluk (generátor, převodovka, natáčecí mechanismy, brzda) a o aerodynamický hluk (interakce proudícího vzduchu s povrchem listů rotoru, uvolňování vzduchových vírů za hranou listů). Obecně se udává jako přípustná hranice hluku ve venkovním prostoru pro denní dobu (6-22 hod.) 50 dB a pro noc 40 dB.

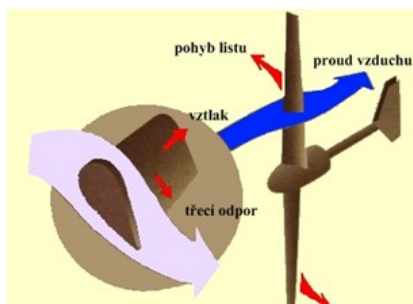
Dalším často diskutovaným problémem je narušení krajinného rázu patřící k citlivým a často subjektivním hlediskům. Větrné elektrárny zvláště na vysokých tubusech nebo větrné farmy naruší vzhled krajiny. Velké větrné elektrárny, které je nutno kvůli využití větrného potenciálu stavět na kopce nebo na otevřené rovině se stávají novými výškovými dominantami na území v okruhu až 6 km, kde jsou zřetelně viditelné. Dobře viditelné mohou být do 10 km, slabě pak do 20 km. Nelze určit jednotný závazný postup a vždy bude záviset na stanovisku příslušných orgánů ochrany přírody a krajiny.

Další důležité podmínky pro umístění větrné elektrárny:

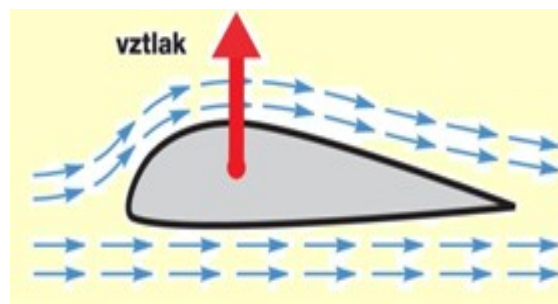
- umístění lokality
- geologické podmínky
- přístupnost pro stavební mechanismy
- vyřešení majetkoprávních vztahů ve vztahu k pozemku
- vzdálenost elektrického vedení a kapacita trafostanice
- dohoda s příslušnou energetickou společností o připojení a výkupu elektrické energie
- ostatní podmínky (ochrana přírody, šíření rádiového a TV signálu)

5 Princip činnosti větrných elektráren

Jak vítr vzniká jsme si již popsali v *kapitole 2.1*, teď si řekneme, na jakém principu využívá větrná elektrárna energii větru. Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína, umístěná na stožáru, energii větru na mechanickou rotační energii (*obr. č. 5.1*). Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly, listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídla letadla (*obr. č. 5.2*). [17]



Obr. č. 5.1 Působení aerodynamických sil [17]



Obr. č. 5.2 Proudění podél listu [17]

Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztlakové síly s druhou mocninou rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Odhad výkonu je tedy možné přibližně stanovit pomocí rovnice:

$$P = 0,2 * v^3 * D^2 \quad [W] \quad (5.1)$$

Kde: P je výkon zařízení

v je rychlost větru

D je průměr vrtule

V praxi samozřejmě nemůže růst výkon větrné elektrárny do nekonečna. Existuje vždy konkrétní "výkonový strop", kdy již s rostoucí rychlostí proudění větru výkon turbíny neroste. To je zajištěno rychlou automatickou regulací výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny. Bez ní by lehce mohlo dojít k poškození nebo zničení generátoru a mechanických částí elektrárny. [18]

6 Rozdělení větrných elektráren

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [24].

Větrné elektrárny můžeme dělit podle různých aspektů.

6.1 Podle koncepce větrné elektrárny

Podle tohoto kritéria rozlišujeme dva základní typy:

- **Zařízení s vertikální osou rotace**

V praxi se tento typ elektráren v evropských podmínkách moc nepoužívá, u těchto strojů dochází k mnohem vyššímu mechanickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost. Další nevýhodou je výška rotoru nad terénem, kde v menších výškách je menší rychlost větru a z toho plynoucí menší účinnost. Jejich výhodou ale je, že se nemusí natáčet do směru větru a i výstavba je jednodušší.

- **Zařízení s horizontální osou rotace**

Nejrozšířenější typ větrných elektráren v současnosti je typ s vertikální osou rotace a můžeme zde zařadit větrné elektrárny s vrtulí a oběžnými koly. Rotor se nastavuje kolmo na směr větru a jeho listy jsou vysoko nad zemí, tím pádem účinnost rotoru je vyšší.

6.2 Podle aerodynamického principu

Tento princip je pro činnost dnešních větrných elektráren nejdůležitější a podle něj dělíme elektrárny na dva typy:

- **Větrné elektrárny pracující na odporovém principu**

Patří mezi nejstarší a stroje mohou mít horizontální i vertikální osu otáčení. Jejich podstatou je, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor, proud vzduchu zpomaluje a je na ní vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována obvykle na rotační pohyb, jak vidno z *obr. č. 6.1*.

- **Větrné elektrárny pracující na vztakovém principu**

Do této kategorie patří jak vrtule, tak lopatková kola s horizontální osou rotace, tak i elektrárny s vertikální osou rotace. U rotoru pracujících na vztakovém principu jsou listy rotoru tvarované tak, aby vznikla potřebná vztaková síla uvádějící rotor do pohybu, jak vidno z *obr. č. 6.2*. Do této kategorie patří i klasické větrné elektrárny s vodorovnou osou rotace.



Obr. č. 6.1 Rotor Savonius [18]



Obr. č. 6.2 Rotor Darrieus [19]

6.3 Podle výkonu větrných elektráren

Jako poslední rozdělení si uvedeme dělení podle výkonu:

- **Malé větrné elektrárny**

Za malé větrné elektrárny se považují turbíny s nominálním výkonem menším než 60 kW a průměrem vrtulí do 16 m.

- **Střední větrné elektrárny**

Do této kategorie řadíme turbíny s nominálním výkonem v rozsahu 60 kW až 750 kW a průměrem vrtulí od 16 m do 45 m.

- **Velké větrné elektrárny**

Za velké větrné elektrárny považujeme turbíny s nominálním výkonem 750 až 6400 kW a průměrem vrtulí 45 m až 128 m.

7 Návrh listu rotoru větrné elektrárny

V této kapitole dle zadání bakalářské práce je zpracován výpočet základních rozměrů listu větrné elektrárny. Pro výpočet samotného listu budu aplikovat dvě teorie výpočtů základních rozměrů listu větrné elektrárny a to Betzovu a Schmitzovu teorie, dle literatury [2].

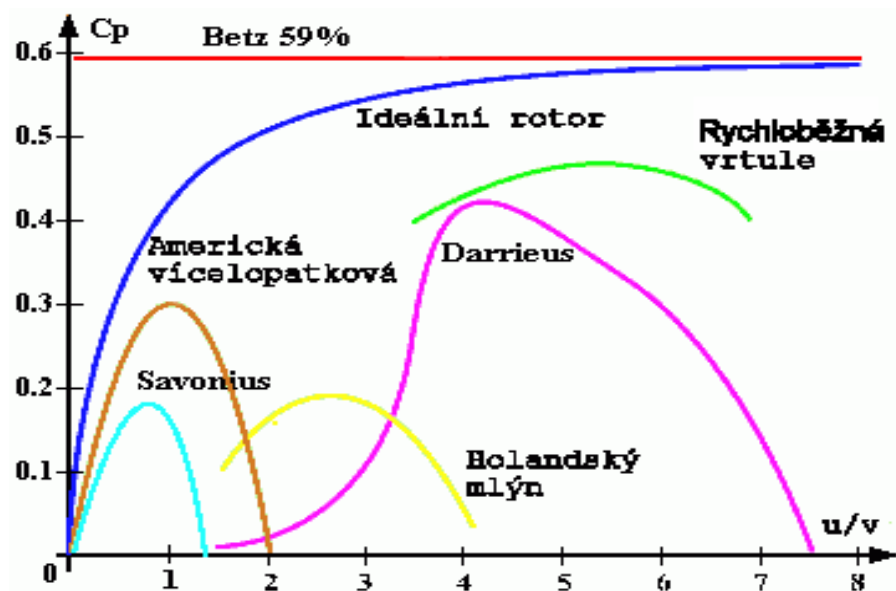
8 Betzova teorie

Albert Betz (*obr. č. 8.1*), (1885-1968) německý fyzik, který se proslavil svými studiemi o větrem poháněných strojích. Betz zformuloval v roce 1919 pravidlo, které určuje, maximální množství energie, které lze získat z pohybujícího se proudu vzduchu, tj. maximální míru přeměny kinetické energie proudu vzduchu na mechanickou energii. Pro odvození maximální účinnosti takového stroje (například větrné turbíny) lze vycházet z představy, že médium se pohybuje osově ve válci s průřezem rovným průřezu disku rotoru s odpovídající rychlostí průtoku média. [21]



Obr. č. 8.1 Albert Betz [21]

Betzovo pravidlo říká, že ve větrných turbínách lze převést maximálně $16/27$ (tj. 59,26%) kinetické energie větru na mechanickou energii rotoru. Nicméně v praxi je reálná účinnost větrných turbín vždy nižší než účinnost podle Betze, jelikož dochází k tření vzduchu, tvoří se víry a také mechanické podmíněné ztráty. Podle druhu větrného rotoru se celková účinnost větrných elektráren pohybuje v rozmezí 15% - 45% (*graf č. 8.1*). Betzova teorie je i v dnešní době základem pro konstrukci rotorů.



Graf č. 8.1 Účinnost větrných rotorů [22]

8.1 Návrh listu dle Betze

Zde je uveden postup pro výpočet listu rotoru dle Betzovy teorie.

Maximální výkon, který lze stanovit dle Betze je dán vzorcem:

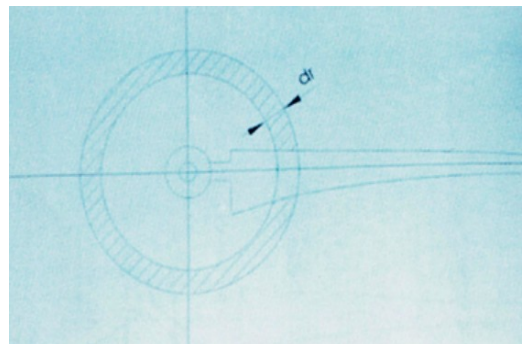
$$\dot{E}_{Betz} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad [\text{W}] \quad (8.1)$$

Jak list opisuje kruhovou plochu, bude maximální výkon definován:

$$\dot{E}_{Betz} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} v_1^3 (\pi * R^2) \quad [\text{W}] \quad (8.2)$$

Každé mezikruží definované prvkem $2\pi r dr$ má dílčí výkon dán:

$$\dot{E}_{Betz} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} v_1^3 (2\pi r dr) \quad [\text{W}] \quad (8.3)$$



Obr. č. 8.2 Znázornění dílčí plochy dr [2]

Pro návrh úhlu náběhu se používá optimum poměru součinitele vztlaču a odporu, kdy tento poměr se nazývá jemností profilu, jelikož $C_D \ll C_L$, odporovou sílu je možno z důvodu její velikosti ve výpočtu v podstatě zanedbat.

$$dU = dl \cos\gamma = \frac{\rho}{2} c_L w^2 c(r) dr \cos\gamma \quad [\text{rad}] \quad (8.4)$$

Výkon dP je dán:

$$dP = n\Omega r \frac{\rho}{2} c_L w^2 c(r) dr \cos\gamma \quad [\text{W}] \quad (8.5)$$

Kde n představuje počet listů a Ωr otáčky rotoru. Vzorec (8.5) pro mechanickou energii položíme rovno vyjádření výkonu dle Betze, $dP = d\dot{E}_{\text{Betz}}$, pak získáme důležitý vzorec pro určení hloubky tětiny profilu $c(r)$ pro optimálně navržený list větrné elektrárny.

$$c(r) = \frac{1}{n} \frac{16}{27} \frac{2\pi r}{c_L} \frac{v_1^3}{w^2 \Omega r \cos\gamma} \quad [\text{m}] \quad (8.6)$$

Pomocí trojúhelníku rychlosti pak:

$$v_1 = \frac{3}{2} w \cos\gamma \quad [\text{m/s}] \quad (8.7) \quad \text{a} \quad u = \Omega r = w \sin\gamma \quad [\text{m/s}] \quad (8.8)$$

Výsledkem úprav je vztah:

$$c(r) = \frac{1}{n} 2\pi R \frac{8}{9c_L} \frac{1}{\lambda_D \sqrt{\lambda_D^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad [\text{m}] \quad (8.9)$$

Přičemž λ_D je zvolený optimální rychlostní součinitel pro daný větrný motor a c_L je součinitel vztlaču, který může být konstantní po celé délce listu r , ale není to nutné. Je běžnou praxí navrhnout hodnotu c_L co nejblíže poměru.

$$\varepsilon = \frac{c_L}{c_D} \approx \varepsilon_{\max} \quad [1] \quad (8.10)$$

Kromě tětiny listu musí být stanoven i úhel $\beta(r)$:

$$\beta(r) = \gamma(r) + \alpha_A(r) \quad [\text{rad}] \quad (8.11)$$

Zvolením rychlostního součinitele λ_D je určen úhel γ ve směru relativní rychlosti v závislosti na poloměru. Úhel je dán rovnicí:

$$\gamma(r) = \tan^{-1} \left(\frac{3}{2} \frac{r}{R} \gamma \lambda_D \right) \quad [\text{rad}] \quad (8.12)$$

Kromě tohoto úhlu (γ), musí být úhel α_A zahrnut do úhlu $\beta(r)$ jako α_A a součinitel vzlaku C_L z něhož vychází výpočet třetivy listu.

Pak je dáno:

$$\beta(r) = \tan^{-1} \left(\frac{3}{2} \frac{r}{R} \alpha \lambda_D \right) + \alpha_A \quad [\text{rad}] \quad (8.13)$$

8.2 Výpočet listu dle Betze

Zadané hodnoty pro výpočet, jsou zobrazeny v *tabulce č. 8.1*.

Výkon elektrárny	P	2 MW
Účinnost obvodová	η_{obv}	0,4
Účinnost mechanická	η_{mech}	0,98
Účinnost elektrická	η_{el}	0,97
Rychlost větru návrhová	$v_{vět}$	12 m/s
Rychlostní součinitel lambda	λ	5
Teplota vzduchu	t	15°C
Počet lopatek	z	3
Součinitel vzlaku	c_y	0,9
Součinitel odporu	c_x	0,008

Tabulka č. 8.1 Zadané hodnoty

Vypracování:

Hustota vzduchu: V literatuře se udává, že hustota vzduchu $[\rho]$ při normálním tlaku $[P_{bar}]$ (tento tlak je průměrně 1013,25 hPa) a teplotě 0°C je 1,3kg/m³. Při výpočtu použijeme plynovou konstantu $r=287\text{J/kg.K}$ a teplotu dosazujeme v Kelvinech.

$$\rho = \frac{P_{bar}}{r \cdot T} = \frac{101325}{287 \cdot (273,15 + 15)} = 1,225 \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (8.14)$$

Výkon větru: Při tomhle výpočtu dosazujeme zadaný výkon elektrárny [P] ku zadaným účinnostem [η]. Dosazujeme účinnost obvodovou [η_{obv}], kterou definujeme jako poměr přenesené a přivedené práce na rotor, účinnost mechanickou [η_{mech}], tj. míra využití mechanické energie a účinnost elektrickou [η_{el}].

$$P_{v\acute{e}t} = \frac{P}{\eta_{obv} * \eta_{mech} * \eta_{el}} = \frac{2}{0,4 * 0,98 * 0,97} = 5,260 \text{ [MW]} \quad (8.15)$$

Poloměr rotoru: Při výpočtu již dosazujeme námi vypočtené hodnoty hustoty vzduchu a výkon větru. Rychlost větru [$v_{v\acute{e}t}$] dosazujeme dle rychlosti větru, při které větrná elektrárna má dosahovat jmenovitého výkonu 2 MW.

$$R_k = \sqrt{\frac{P_{v\acute{e}t}}{v_{v\acute{e}t}^3 * \frac{1}{2} * \rho * \pi}} = \sqrt{\frac{5,260 * 10^6}{12^3 * \frac{1}{2} * 1,225 * \pi}} = 39,769 \cong 40 \text{ [m]} \quad (8.16)$$

Unášivá rychlost na konci listu: Pro zvolený rychlostní součinitel [λ], jenž se popisuje jako bezrozměrný poměr obvodové rychlosti rotoru a rychlosti větru pak dostaneme (pro daný typ větrné elektrárny hodnota $\lambda=5$):

$$u_R = v_{v\acute{e}t} * \lambda = 12 * 5 = 60 \text{ [m/s]} \quad (8.17)$$

Úhlová rychlost:

$$\omega = \frac{u_R}{R} = \frac{60}{40} = 1,5 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (8.18)$$

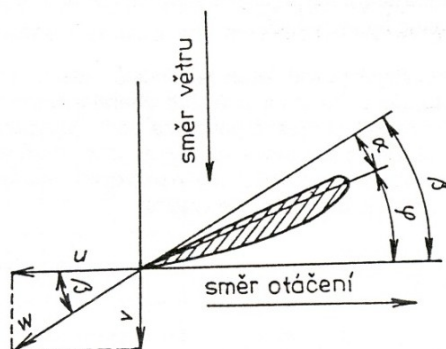
Výpočet listu:

List byl rozdělen na jednotlivé segmenty o stejné šířce $dr = 0,5 \text{ m}$, kdy pro každý segment byly vypočteny základní parametry geometrie, silových účinků a příspěvku výkonu. Pro výpočet byla vytvořena výpočtová tabulka (příloha č. 1) v programu MS Excel, kde jsou zobrazeny všechny hodnoty pro celou délku listu větrné elektrárny v intervalu $0,5 \text{ m}$.

Byl zvolen aerodynamický profil NACA 4412, se kterým je dále pracováno pro zjednodušení výpočtu na celé délce listu.

Pro ukázkou si ukážeme výpočet hodnot pro segment ve vzdálenosti (délku listu) 20 m (což je 40. řádek tabulky), stejný postup výpočtu je použit pro každý řádek tabulky.

Poloměr rotoru: $R_k = 20 \text{ m}$



Obr. č. 8.3 rychlostní trojúhelník na listu větrné elektrárny [2]

Unášivá rychlost: Je část celkové rychlosti uvažovaného hmotného bodu.

$$u = R_k * \omega = 20 * 1,5 = 30 \text{ [m/s]} \quad (8.19)$$

Relativní rychlost: Relativita pohybu znamená, že pohyb je relativní, neboli závisí na tom, kdo jej pozoruje – závisí na vztažné soustavě, vzhledem ke které se pohyb zkoumá.

$$w = \sqrt{u^2 + \left(\frac{2}{3} * v_{v\acute{e}t}\right)^2} = \sqrt{30^2 + \left(\frac{2}{3} * 12\right)^2} = 31,048 \text{ [m/s]} \quad (8.20)$$

Úhel beta:

$$\beta = \arcsin \frac{\left(\frac{2}{3} * v_{v\acute{e}t}\right)}{w} = \arcsin \frac{\left(\frac{2}{3} * 12\right)}{31,048} = 0,261 \text{ [rad]} = 14,931[^\circ] \quad (8.21)$$

Úhel gama: Jde o úhel nastavení profilu.

$$\gamma = \arccos \frac{\left(\frac{2}{3} * v_{v\acute{e}t}\right)}{w} = \arccos \frac{\left(\frac{2}{3} * 12\right)}{8,035} = 1,310 \text{ [rad]} = 75,069[^\circ] \quad (8.22)$$

Hloubka tětiny profilu: Tětiva profilu je velmi důležitá vztažná čára, pokládáme ji vztažnou osou profilu. K tětivě vztahujeme významné úhly.

$$H_{top} = \eta_{obv} * \eta_{mech} * \eta_{el} * \left(\frac{16}{27}\right) * \frac{2 * \pi * v_{v\dot{e}t}^3 * R_k}{z * C_y * w^2 * u * \cos \gamma} \quad [\text{m}] \quad (8.23)$$

$$H_{top} = 0,4 * 0,98 * 0,97 * \left(\frac{16}{27}\right) * \frac{2 * \pi * 12^3 * 20}{3 * 0,9 * 31,048^2 * 30 * \cos 1,310} = 2,432 \quad [\text{m}]$$

Plocha elementu: Plocha počítaného úseku.

$$S = H_{top} * (R_{k_{-i}-1} - R_{k_{-1}}) = 2,432 * (20 - 19,5) = 1,216 \quad [\text{m}^2] \quad (8.24)$$

Síla odporová: Jedná se o fyzikální veličinu, vyjadřující velikost odporu proti pohybu těles v tekutině (v našem případě list rotoru).

$$F_{odp} = \frac{1}{2} * \rho * S * c_x * w^2 \quad [\text{N}] \quad (8.25)$$

$$F_{odp} = \frac{1}{2} * 1,225 * 1,216 * 0,008 * 31,048^2 = 5,744 \quad [\text{N}]$$

Její velikost pak zanedbáváme.

Síla vztlaková: Je síla, aerodynamická působící na daný geometrický útvar, která nadnáší těleso při pohybu v tekutině (vzduchu).

$$F_{vz} = \frac{1}{2} * \rho * S * c_y * w^2 \quad [\text{N}] \quad (8.26)$$

$$F_{vz} = \frac{1}{2} * 1,225 * 1,216 * 0,9 * 31,048^2 = 646,174 \quad [\text{N}]$$

Síla obvodová:

$$F_{obv} = F_{vz} * \sin \gamma = 646,174 * \sin 1,310 = 654,356 \quad [\text{N}] \quad (8.27)$$

Moment: Vyjadřuje působení síly na bod vzdálený od osy otáčení.

$$M = F_{obv} * R_k = 654,356 * 20 = 12\,487,125 \text{ [Nm]} \quad (8.28)$$

Součet momentů: Součet všech momentů v délce jednotlivých segmentů.

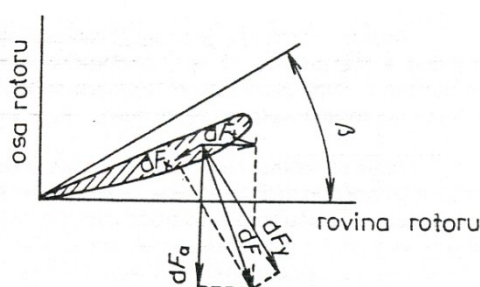
$$\Sigma M = M_{R=0} + M_{R=0,5+\dots} + M_{R=39,5} = 1\,329\,421,330 \text{ [Nm]} \quad (8.29)$$

Výkon elementu:

$$P = M * \omega = 12\,487,125 * 1,5 = 18\,730,680 \text{ [W]} \quad (8.30)$$

Součet výkonů: Součet všech výkonů v délce jednotlivých segmentů.

$$\Sigma P = P_{R=0} + P_{R=0,5} + P_{R=39,5} = 2\,035\,557,530 \text{ [W]} \cong 2,035 \text{ [MW]} \quad (8.31)$$



Obr. 8.4 Silové působení na list rotoru [2]

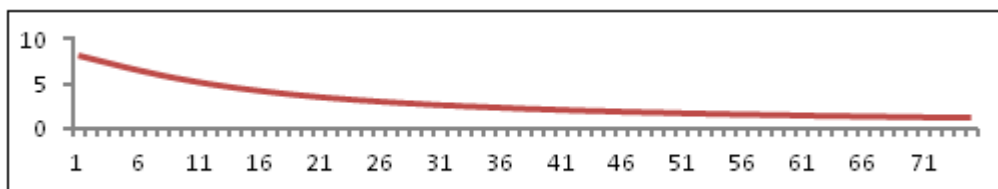
8.3 Závěr k výpočtu dle Betzovy teorie:

V této části práce byl proveden výpočet základních rozměrů listu větrné elektrárny a to dle teorie Betzovy pro zadaný výkon větrné elektrárny.

V provedených výpočtech byl realizován návrh listu rotoru větrné elektrárny podle teorie Betzovy pro zadaný výkon 2 MW.

Vypočtený teoretický výkon pak je 2,035 MW, což se téměř blíží požadované hodnotě 2 MW, odchylku lze zanedbat, nebo uvažujeme s průměrem gondoly, kdy příspěvek těchto elementů samozřejmě neexistuje.

Z vypočtených hodnot jsem sestavil *graf č. 8.2* v programu MS Excel. Z grafu je vidět jaká bude hloubka profilu listu vrtule větrné elektrárny dle Betzovy teorie, osa x představuje náběžnou hranu a červená čára odtokovou hranu listu.



Graf č. 8.2 Hloubka profilu dle Betzovy teorie

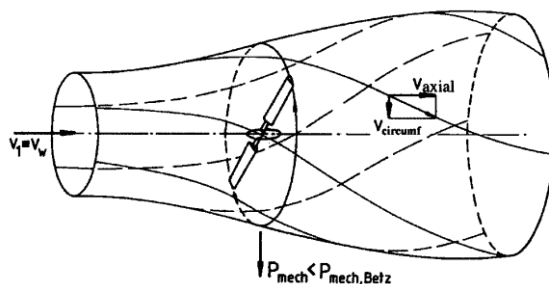
9 Schmitzova teorie

Výpočet dle Schmitzovy teorie respektuje ztráty vzniklé v důsledku rotace proudu vzduchu, které vyplývají ze získání točivého momentu v aktivní rovině rotace, viz. obr. 9.1.

9.1 Návrh listu dle Schmitzovy teorie

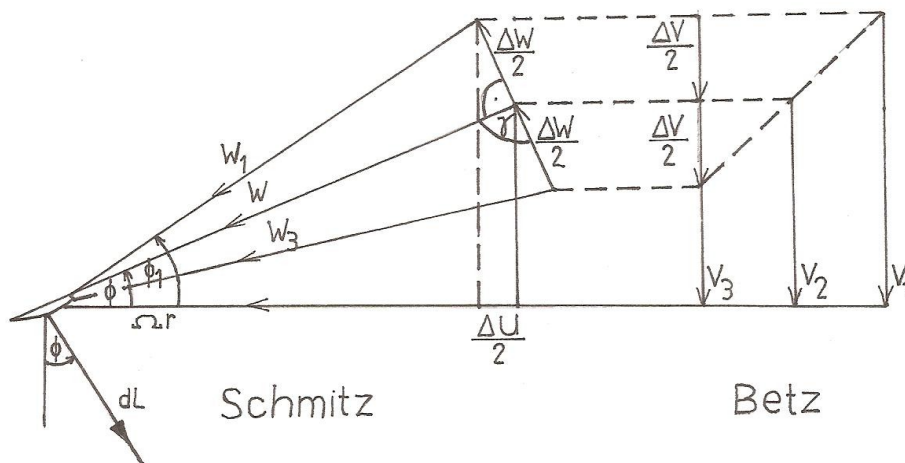
Návrh listu větrné elektrárny dle Betzovy teorie předpokládá, že rychlost proudění vzduchu je z původní rychlosti v_1 přes rovinu rotoru rychlosti $v_2 = (v_1 + v_3)/2$ na listu větrné elektrárny zpomaleno na rychlost za rovinou rotoru $v_3 = v_1/3$, kdy při tomto poměru rychlosti lze dosáhnout maxima transformace kinetické energie větru na mechanickou energii rotoru, za předpokladu výhradně axiálního směru proudění.

Teorie Schmitzova pak bere dále v úvahu i tangenciální složku rychlosti proudu větru v rovině listu a za listem rotoru viz. obr. 9.1.



Obr. 9.1 Předpoklad proudění vzduchu dle Schmitze [2]

Teorie Schmitzova pak výpočet základních parametrů přibližuje reálným podmínkám.



Obr. č. 9.2 Rychlostní trojúhelníky na listu větrné elektrárny dle Schmitzovy teorie [2]

Obrázek č. 9.2 ukazuje rychlostní trojúhelníky a pozici profilu listu zřejmou k rychlosti větru w . Jestliže rychlost větru w se pak skládá z axiálního proudu podle Betz $v_2 = \frac{2v_1}{3}$ a obvodové rychlosti proudu, obvodová rychlost u je pak dána:

$$u = r\Omega + \frac{\Delta u}{2} \quad [\text{m/s}] \quad (9.1)$$

Další tečná složka dU je definována pouze pro rovinu rotoru, před a za, je použita průměrná hodnota $\frac{\Delta u}{2}$. Hodnota Δu bude v případě pro optimální transformaci energie větru závislá na rychlostním součiniteli λ_D .

Místo úhlu γ , který je určen od osy stroje, používáme zde úhel ϕ (pro výpočet polohy w). Úhel ϕ je definován od roviny otáčení $\phi = 90 - \gamma$.

$$dL = \Delta w * d\dot{m} \quad [\text{N}] \quad (9.2)$$

Hmotnostní průtok mezikruží, viz *obr. č. 9.1* je:

$$d\dot{m} = 2\rho\pi r dr v_2 \quad [\text{kg/s}^{-1}] \quad (9.3)$$

Výkon na mezikruží, zanedbáme zde aerodynamický odpor, se získá ze vztahu:

$$dP = dM\Omega = dUr\Omega = dL \sin(\phi)r\Omega \quad [\text{W}] \quad (9.4)$$

Z *obrázku č. 9.1* plynou následující geometrické závislosti:

$$\text{V rovině rychlosti:} \quad w = w_1 * \cos(\phi_1 - \phi) \quad [\text{m/s}] \quad (9.5)$$

$$\text{V axiální rovině rychlosti:} \quad v_2 = w \sin(\phi) = w_1 \cos(\phi_1 - \phi) \sin(\phi) \quad [\text{m/s}] \quad (9.6)$$

$$\text{V rovině změny rychlosti:} \quad \Delta w = 2w_1 \sin(\phi_1 - \phi) \quad [\text{m/s}] \quad (9.7)$$

Z tohoto je dán výkon:

$$\begin{aligned} dP &= r\Omega d\dot{m} \Delta w \sin(\phi) = r\Omega \rho 2\pi r dr w_1 \cos(\phi_1 - \phi) \sin(\phi) 2w_1 \sin(\phi_1 - \phi) \sin(\phi) = \\ &= r^2 * \Omega \rho * 2\pi * r * dr * w_1^2 * \sin[2(\phi_1 - \phi)] \sin^2 \phi \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (9.8)$$

Odvozením pro $\frac{dP}{d\phi} = 0$ získáváme úhel zdánlivého směru větru poskytující maximální výkon:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\phi} &= (r^2 \Omega \rho 2\pi dr w_1^2) (-2 \cos[2(\phi_1 - \phi)] \sin^2 \phi + 2 \sin[2(\phi_1 - \phi)] \sin \phi \cos \phi = \\ &= (r^2 \Omega \rho 2\pi dr w_1^2) 2 \sin \phi [\sin[2(\phi_1 - \phi)] \cos \phi - \cos[2(\phi_1 - \phi)] \sin \phi] = \\ &= (r^2 \Omega \rho 2\pi dr w_1^2) 2 \sin \phi (\sin(2\phi_1 - \phi)) \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (9.9)$$

To dává:

$$\phi = \frac{2}{3} \phi_1 \quad [\text{rad}] \quad (9.10)$$

Jako optimální úhel relativní rychlosti větru:

$$\tan \phi_1 = \frac{v_1}{r\Omega} = \frac{R}{\lambda_D r} \quad [\text{rad}] \quad (9.11)$$

To se vztahuje k poměru otáček.

S tímto úhlem $\phi = 2\phi_1/3$, můžeme získat vztlakovou sílu dL z rovnice číslo 9.2:

$$\begin{aligned} dL &= \Delta w d\dot{m} = \rho 2\pi e d r w_1^2 \cos(\phi_1 - \phi) \sin(\phi) 2w_1 \sin(\phi_1 - \phi) = \\ &= \rho 2\pi r d r w_1^2 4 \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \cos^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad [\text{N}] \end{aligned} \quad (9.12)$$

Pokud je teorie profilu lopatek použita pro výpočet, odpovídající tětíva listu $c_{total}(r)$, pak vztlaková síla dL je rovna:

$$dL = \frac{\rho}{2} w_1^2 c_{tot} d r c_L \quad [\text{N}] \quad (9.13)$$

Po transformaci:

$$dL = \frac{\rho}{2} w_1^2 c_{tot} d r c_L \cos^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad [\text{N}] \quad (9.14)$$

Když položíme rovno rovnici 9.14 a rovnici 9.15 tak výsledný vzorec pro hloubku profilu dle Schmitze je:

$$c_{tot}(r) = \frac{16\pi r}{c_L} \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad [\text{m}] \quad (9.15)$$

Pokud celková délka hloubky profilu se rozkládá na n listů, bude rovnice vypadat:

$$c_{Schmitz}(r) = \frac{1}{n} \frac{16\pi r}{c_L} \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad [\text{m}] \quad (9.16)$$

9.2 Výpočet listu dle Schmitze

Jako u teorie Betz je i zde cílem výpočtu získání především hloubky profilu a dalších údajů definujících základní geometrii.

Byl zde stejně jako u teorie Betz zvolen aerodynamický profil NACA 4412, se kterým je dále pracováno pro zjednodušení výpočtu na celé délce listu.

Definujeme úhel φ , který je optimální ve směru relativní rychlosti:

$$\tan \varphi = \frac{v_1}{r\Omega} = \frac{R}{\lambda_d r} \quad [\text{rad}] \quad (9.17)$$

pak

$$\varphi(r) = \tan^{-1} \frac{v_1}{r\Omega} \quad [\text{rad}] \quad (9.18)$$

Stejně jako u výpočtu listu podle Betzovy teorie je níže uveden výpočet listu ve vzdálenosti 20 m od osy rotace (40. řádek tabulky), výpočty pro celou délku listu (viz. příloha č. 2) jsou provedeny v programu MS Excel.

$$\varphi(20) = \tan^{-1} \frac{12}{20 \cdot 1,5} \quad [\text{rad}] \quad (9.19)$$

$$\varphi(20) = 0,380 \quad [\text{rad}]$$

Podobně jako u předešlých výpočtů si pro lepší orientaci převedeme radiány na stupně pomocí vztahu:

$$\varphi(20) = 0,380 \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} = 21,801 \quad [^\circ] \quad (9.20)$$

Podle Schmitzovy teorie je hloubka profilu dána vztahem:

$$c_{Schmitz}(r) = \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{obv}} \cdot \eta_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{gen}} \cdot \frac{1}{n} \frac{16\pi r}{c_y} \sin^2 \left(\frac{\varphi}{3} \right) \quad [\text{m}] \quad (9.21)$$

Dosazení pro φ (20 m):

$$c_{Schmitz}(20) = \frac{0,44*0,98*0,97*0,97}{3} * \frac{16*\pi*20}{0,9} \left(\sin \frac{0,380}{3} \right)^2 \quad [\text{m}]$$

Výsledná hloubka profilu dle Schmitzovy teorie ve vzdálenosti 20 m od osy rotace je:

$$c_{Schmitz}(20) = 2,4171832 \quad [\text{m}]$$

VÝPOČET SILOVÝCH ÚČINKŮ NA LIST.

Výpočet silových účinků, momentu a výkonu, dle Schmitzovy teorie je dále proveden taktéž pro aerodynamický profil, segment, ve vzdálenosti 20 m od osy rotace.

K získání síly je důležité znát plochu v jednotlivých dílčích segmentech, na které byl pro účely výpočtu rozdělen list větrné elektrárny.

$$dA = c(r) * dr \quad (9.22)$$

$$dA = 2,4171832 * 0,5$$

$$dA = 1,209 \text{ [m}^2\text{]}$$

dr = 0,5 m je použit pro výpočty v celé délce listu větrné elektrárny

Definiční vztah pro obě aerodynamické síly je stejný s výjimkou součinitelů vztlaku a odporu.

$$F_{vz} = \frac{1}{2} * \rho * c_y * dA * w(r)^2 \quad [\text{N}] \quad (9.23)$$

$$F_{odp} = \frac{1}{2} * \rho * c_x * dA * w(r)^2 \quad [\text{N}] \quad (9.24)$$

Po dosazení:

$$F_{vz} = \frac{1}{2} * 1,225 * 0,9 * 1,209 * 8,035^2$$

$$F_{vz} = 642,252 \text{ N}$$

$$F_{odp} = \frac{1}{2} * 1,225 * 0,008 * 1,209 * 8,035^2$$

$$F_{odp} = 5,709 \text{ N}$$

Celková složka síly je:

$$F_C = F_{vz} * \sin\gamma + F_{odp} * \cos\gamma \text{ [N]} \quad (9.25)$$

Po dosazení dostáváme:

$$F_C = 642,525 * \sin 1,310 + 5,709 * \cos 1,310$$

$$F_C = 622,037 \text{ [N]}$$

Moment pro daný segment úseku:

$$M_i = F_{Ci} * r_i \text{ [Nm]} \quad (9.26)$$

$$M_{20} = 622,037 * 20$$

$$M_{20} = 12440,738 \text{ [Nm]}$$

Výkon pro daný segment úseku:

$$P_i = M_i * \omega \text{ [W]} \quad (9.27)$$

$$P_{20} = 12440,738 * 1,5$$

$$P_{20} = 18661,108 \text{ [W]}$$

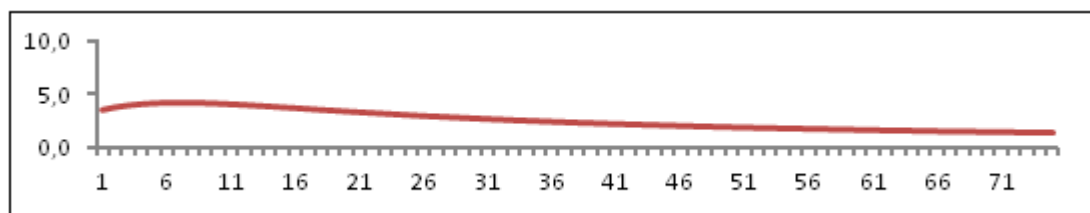
9.3 Závěr k výpočtu dle Schmitzovy teorie:

V této části byl proveden výpočet základních rozměrů listu větrné elektrárny dle teorie Schmitzovy pro zadaný výkon větrné elektrárny.

V provedených výpočtech byl realizován návrh listu rotoru větrné elektrárny dle teorie Schmitzovy pro zadaný výkon 2 MW.

Vypočtený teoretický výkon pak je 2,081 MW což se téměř blíží požadované hodnotě 2 MW.

Z vypočtených hodnot jsem sestavil následující *graf č. 9.1* v programu MS Excel. Z grafu je vidět jaká bude hloubka profilu listu vrtule větrné elektrárny podle Schmitzovy teorie, osa x představuje náběžnou hranu a červená čára odtokovou hranu listu.



Graf. 9.1 hloubka profilu podle Schmitzovy

10 Závěr

Práce byla zpracována v části rešeršní s ohledem na historický vývoj využití větrné energie. Práce se v dalších částech zabývá aspekty využití energie větru, práce dále popisuje současný stav ve výstavbě a provozování větrných parků v ČR.

Dále pak v práci byl proveden výpočet základních rozměrů listu větrné elektrárny a to dle teorie Betzovy a Schmitzovy pro zadaný výkon větrné elektrárny. V těchto provedených výpočtech byl realizován návrh listu rotoru větrné elektrárny pro zadané parametry proudění větru a výkon větrné elektrárny 2 [MW].

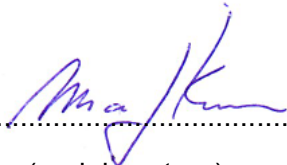
Vypočtený teoretický výkon pak byl 2,035 [MW] dle Betzovy teorie a 2,081 [MW] dle Schmitzovy teorie. Obě tyto hodnoty se téměř blíží požadované hodnotě 2 [MW].

V grafické části práce pak byly vytvořeny základní grafická znázornění vypočtených základních rozměrů listu větrné elektrárny pro zadané teorie.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Zbyszek Szeliga PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě: 21. 5. 2012



.....
(podpis autora)

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] RYCHETNÍK, V. *Větrné motory*. Ostrava: VŠV-TU Ostrava, 1996. 61 s. ISBN 80-7078-281-1

[2] GASH, R., TWELE, J. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. London, 2002. 385 s. ISBN 1-902916-38-7

[3] *Meteocentrum.cz* [online]. c2007, [cit. 2011-11-13]. Dostupné z: <<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr.php>>.

[4] WALLEES, J. *Wikipedia* [online]. c2001, datum poslední revize 18. 4. 2012 [cit. 2011-11-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie>.

[5] *Větrní energie Horní loděnice – Lipina* [online]. c2009, datum poslední revize 1. 4. 2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <<http://www.vehl.cz/>>.

[6] *4-CONSTRUCTION* [online]. c2007, [cit. 2012-01-27]. Dostupné z: <<http://www.4-construction.com/cz/clanek/potencial-vetrne-energie-v-ceske-republice/>>.

[7] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie* [online]. c2006, [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <<http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>>. ISSN 1804-8293

[8] *Q-KLUB* [online]. c1998, [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <<http://www.quido.cz/objevy/vitr.htm>>.

[9] *Větrné mlýny* [online]. c2012, [cit 2012-03-05]. Dostupné z: <<http://www.vmpohledy.estranky.cz/clanky/dochovane-vetrne-cerpadla/rakvice-bv.html>>.

[10] *Z historie větrných elektráren, Elektro* [online]. 2005, roč. 6, č. 12 [cit 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26559>.

[11] *The encyclopedia OF EARTH* [online]. c2006, [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.eoearth.org/article/La_Cour,_Poul>.

[12] HRUŠKA, M. *blog.IDNES.cz* [online]. c2011, [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <<http://miroslavhruska.blog.idnes.cz/c/182577/Vetrne-elektrarny-v-CR-seminarni-prace.html>>.

[13] *Nalezeno.cz* [online]. c2008, [cit. 2012-03-28]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/aktualne/chap_2038/5-nejvetsich-vetrnych-elektraren-v-cr.aspx>. ISSN 1803-4160

[14] *Energie 21* [online]. c2009, [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.energie21.cz/data/Galleries/105/125/p3204_2_1-pchery.jpg>.

[15] ČSVE [online]. c2012, [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: <<http://www.csve.cz/cz/kategorie/vzdelavani/13>>.

[16] SPVEZ [online]. c2012, [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <<http://www.spvez.cz/pages/vitr.htm>>.

[17] FOJTÍKOVÁ, J. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. c2008, [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <<http://www.is.muni.cz/th/128508/>>.

[18] *Vyšší odborná škola a Střední škola, Varnsdorf* [online]. c2011, [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Vetrne%20elektrarny.pdf>>.

[19] *EcoSources.info* [online]. c2008, [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.ecosources.info/en/topics/Savonius_vertical_axis_wind_turbine>.

[20] WALLIS, J. *Wikipedia* [online]. c2012, datum poslední revize 18. 4. 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine>.

[21] *The encyclopedia OF EARTH* [online] c2006, [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.eoearth.org/article/Betz,_Albert>.

[22] *Malé větrné elektrárny* [online]. c2012, [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: <<http://ve.mzf.cz/>>.

[23] POP, L. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR* [online] c2010, [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <<http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/>>.

[24] FOJTÍKOVÁ, Jana. *Větrné elektrárny : Diplomová práce*. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická, 2008, 85 s., 1 s., Vedoucí diplomové práce Gabriela Štěpánová.

[25] *Česká energetika* [online]. c2011, [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <<http://www.ceskaenergetika.cz/index.php?page=page&art=972>>.

12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Výpočtová tabulka s hodnoty pro celou délku listu dle Betzovy teorie (počet stran: 3)
- Příloha č. 2: Výpočtová tabulka s hodnoty pro celou délku listu dle Schmitzovy teorie (počet stran: 3)
- Příloha č. 3: Výkres návrhu listu rotoru větrné elektrárny dle Betzovy teorie (počet stran: 1)
- Příloha č. 4: Výkres návrhu listu rotoru větrné elektrárny dle Schmitzovy teorie (počet stran: 1)
- Příloha č. 5: 3D zobrazení třílístého rotoru větrné elektrárny o výkonu 2MW dle výpočtu podle Betzovy teorie (počet stran: 1)
- Příloha č. 6: 3D zobrazení třílístého rotoru větrné elektrárny o výkonu 2MW dle výpočtu podle Schmitzovy teorie (počet stran: 1)